

李博, 邓超, 周亮, 等. 珠江口盆地恩平凹陷与惠州凹陷断裂特征差异及构造演化[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 34-46.

LI Bo, DENG Chao, ZHOU Liang, et al. Difference in fault characteristics and tectonic evolution between Enping Sag and Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(7): 34-46.

珠江口盆地恩平凹陷与惠州凹陷断裂特征差异及构造演化

李博¹, 邓超^{1,2*}, 周亮¹, 纪凯¹, 舒誉³, 吴宇翔³

(1 西北大学地质学系, 西安 710069; 2 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

3 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000)

摘要:在前人研究基础上,利用珠江口盆地恩平凹陷与惠州凹陷二维地震资料,结合断层活动速率分析方法,研究了凹陷内部断裂体系几何学与运动学差异性。依据断裂特征及其活动性差异,将珠江口盆地北部断裂体系发育演化重新划分为裂陷早期(E_2w)、裂陷晚期(E_2e)、拗陷期($E_3z-N_1z-N_1h$)和构造活化期(N_1y-N_2w-Q)4个构造期次。同时,依据断层展布规模、活动速率大小及活化时期等研究成果,推测惠州凹陷比恩平凹陷更有利于形成大中型油气田。建议将近EW向和NNW向断层作为后期构造研究的重点。

关键词:断层活动速率; 控盆断裂; 构造演化; 恩平凹陷; 惠州凹陷; 珠江口盆地

中图分类号:P744.4; P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.262

0 引言

断裂是油气运移与成藏的主要控制因素,具有输导性和封闭性的双重作用,是寻找油气藏的重要指示性构造^[1-2]。珠江口盆地新近系油气藏具有“下生上储、陆生海储”的特点,古近系文昌组(E_2w)和恩平组(E_2e)的湖相泥岩是其主力烃源岩,新近系中新世珠江组(N_1z)和韩江组(N_1h)的三角洲砂岩是其主要储集层^[3]。活动期断裂正好作为沟通烃源岩和储层的重要通道,而静止期断裂由于“砂泥对接封闭”或“断层面愈合与胶结”又可阻止油气运移并促进圈闭成藏^[4]。

漆家福等^[5]认为,珠江口盆地的形成演化过程主要受基底先存构造与区域应力联合控制,盆地经

历了裂陷期与裂后期2个阶段,同时断裂性质也由深层张性向浅层走滑逐渐过渡。何金海等^[6]认为,恩平凹陷主要受单一低角度正断层控制,断层倾角约 $15^\circ\sim 20^\circ$,凹陷整体呈拆离式半地堑构造形态;惠州凹陷则受南北边界雁列式展布的高角度正断层共同控制,断层倾角约 $55^\circ\sim 60^\circ$,凹陷整体呈现双断或多断的地堑构造形态^[7]。彭辉界等^[8]认为断裂平面展布规模和活动强度与其控制形成的油田油气储量成正比关系;油气聚集成藏的规模与断裂活动强度亦成正比关系。施和生等^[9]认为珠江口盆地的油气成藏期约为10 Ma,因此,只有在中新世晚期粤海组(N_1y)沉积期仍在活动的断裂才是有效的。

恩平凹陷与惠州凹陷作为珠江口盆地北部最重要的产油区域,在近40年的勘探历程中陆续发现了多个大中型油气田,具有较大的油气资源勘探潜力。研究表明,已经发现的油气藏油气富集差异较大,整体分布在已证实富生烃的恩平17洼以及惠州凹陷西部的浅层之中^[10]。目前对于恩平凹陷和惠州凹陷的研究主要集中在盆地结构控制下的生-储-盖组合特征、沉积填充模式及断裂控藏等方面^[11-12],在上述研究成果支持下发现了一大批油气

收稿日期: 2022-09-13

资助项目: 陕西省教育厅科研计划项目(19JK0851); 博士后基金(234012000002)

作者简介: 李博(1994—),男,在读硕士,主要从事地震反演与构造解释方面的研究工作。E-mail: 1639759327@qq.com

* 通讯作者: 邓超(1987—),男,博士,副教授,主要从事储层地震反演与数值模拟及油区构造解析方面的研究工作。E-mail: dengchao@nww.edu.cn

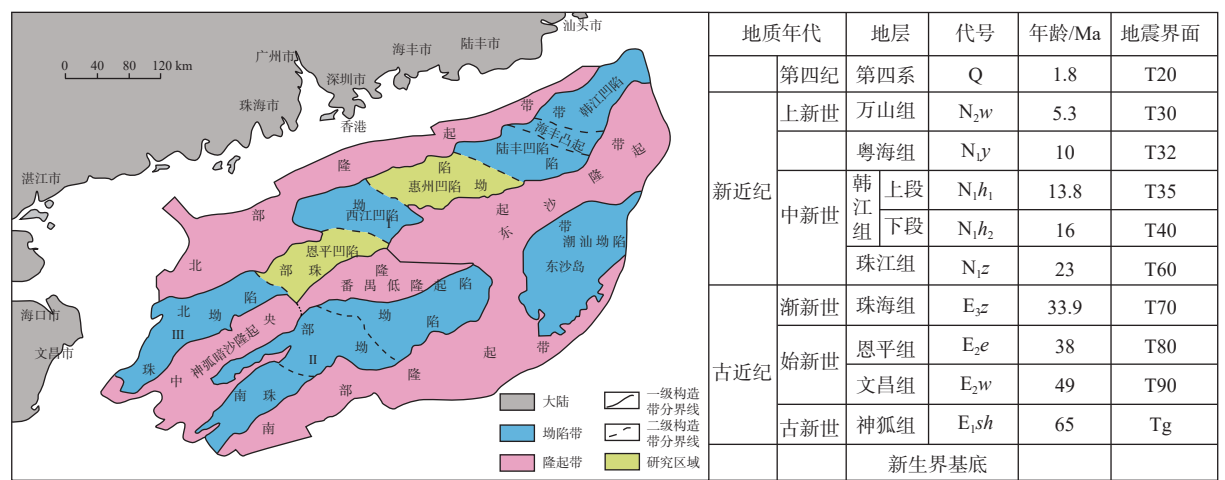
田,同时也暴露了一些问题:①恩平凹陷与惠州凹陷两者内部结构特征存在哪些差异性?②其差异性对盆地的构造演化有何启示?③其差异性对油气富集区带预测及勘探开发有何借鉴?因此,本文主要对恩平凹陷与惠州凹陷的断裂特征进行差异性分析并比较预测油气富集区带,同时重新厘定了珠江口盆地的构造演化过程,以期为珠江口盆地恩平凹陷与惠州凹陷以及类似的裂陷盆地油气勘探提供参考。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于中国南海北部,东西长约为 800 km,南北宽约为 100~360 km,面积约为 $26\times 10^4\text{ km}^2$ 。其属于华南板块在南海的延伸部分,同时又是欧亚板块、印度板块和太平洋板块的应力交汇地带,是一个内部构造演化十分复杂的被动大陆边缘裂陷盆地^[13]。盆地在 NE 向和 NW 向断裂的切割下,整体呈现“东西分块、南北分带”的构造格局^[14],从南向北依次分布有南部隆起带、南部坳陷

带、中央隆起带、北部坳陷带、北部隆起带。本次研究区域主要为北部坳陷带内的次一级凹陷:恩平凹陷和惠州凹陷(图 1)。

区域构造演化上,以破裂不整合面 T70 为界,新生代珠江口盆地经历了三幕式裂陷作用,最终形成“下断上拗,先陆后海”的双层构造演化模式^[15-16]。裂陷期主要包括 2 次区域构造事件:一为珠琼运动一幕,主要是太平洋板块向下俯冲与欧亚板块相互碰撞,早期 NE 向断层进一步发育;二为珠琼运动二幕,主要是印度板块以 NE 向与欧亚板块发生陆-陆“硬碰撞”作用,产生了近 SN 向应力拉张作用^[17-18]。裂陷期发育多个小型沉积单元,沉积了文昌组和恩平组 2 套主力烃源岩层。裂后拗陷期,新南海开始扩张,南沙块体向南漂移,凹陷内断裂活动较平静,主要以海相沉积为主,从老至新依次沉积了珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组等地层,其中珠江组和韩江组为主要储油层。裂后活化期,研究区处于印度板块 NE 向和菲律宾板块 NW 向的共轭挤压背景下^[19],致使先存近 EW 向与 NWW 向控盆断裂复活,并发育了一系列 NWW 向新生小断裂。



据文献 [3] 修改

图 1 珠江口盆地区域构造图与地层划分

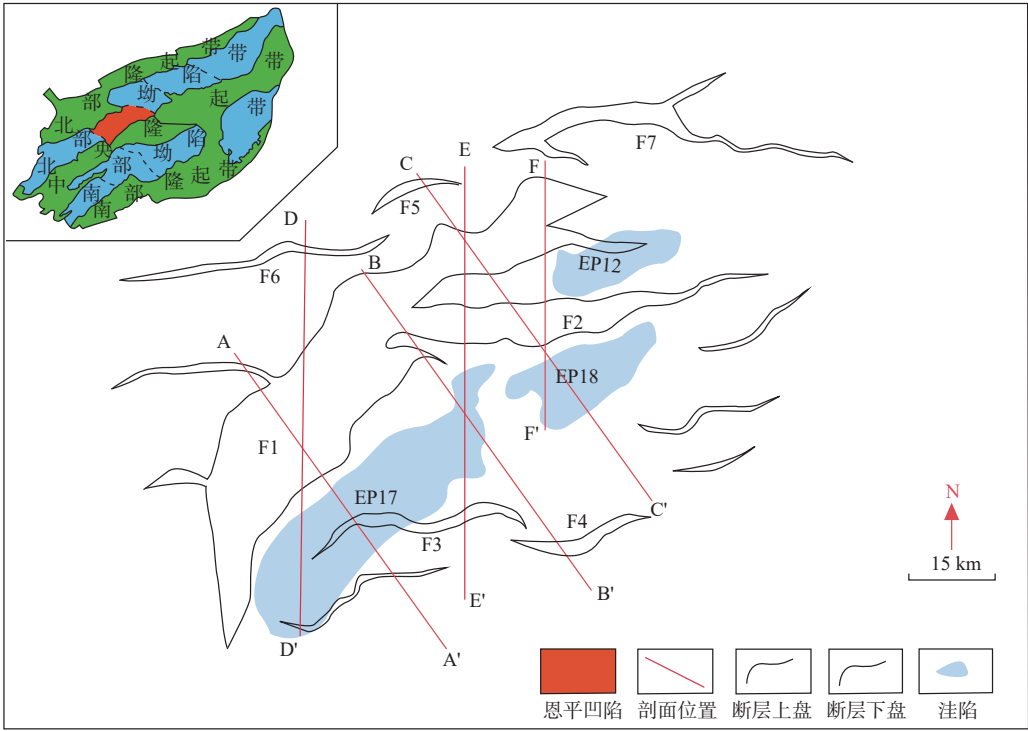
Fig.1 Regional tectonic map and stratigraphic division of the Pearl River Mouth Basin

2 断裂体系的静态识别与结构特征

2.1 恩平凹陷

恩平凹陷主要发育 NE、NEE 和近 EW 向断裂。F1 断层在平面上延伸长度约 60 km,自西向东走向由 SN 向转变为 NE—SW 向,即呈现向 NW 弯曲突出的展布形态。(图 2)。在剖面上呈现为低角度正

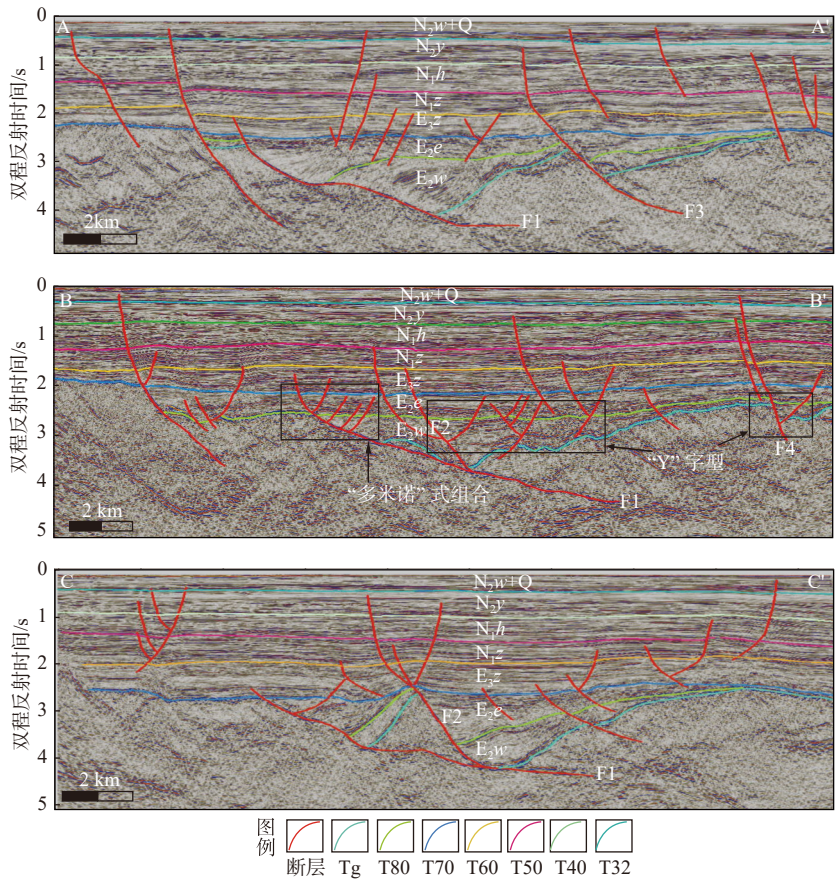
断层,主要切割了恩平组与文昌组以及部分珠海组地层。在文昌组沉积时期断层两盘最大断距约为 1 553 msTWT,恩平组沉积期最大断距约 395 msTWT(图 3 AA')。F1 上盘发育同沉积构造,文昌组与恩平组呈靠近断层面逐渐扩大的楔状体沉积形态,表明此生长地层在沉积过程中发生了旋转。F1 上盘一些次级断裂与 F1 形成“Y”字型组合构造,体现了张扭应力状态(图 3 BB'、EE')^[20]。整体来看,F1 断层为恩平凹陷边界主要控凹断裂,断面形态沿



据文献 [21] 修改

图 2 恩平凹陷主干断裂展布

Fig.2 Distribution of the main faults in Enping Sag



测线位置见图 2

图 3 恩平凹陷 NW—SE 向测线剖面特征

Fig.3 Profile characteristics of NW—SE line survey in the Enping Sag

其走向具有明显的差异性, NE—SW 向东段的北部(图 3AA')和南部(图 3CC')表现为坡坪式正断层, 而在中部(图 3BB')则表现为铲式正断层。

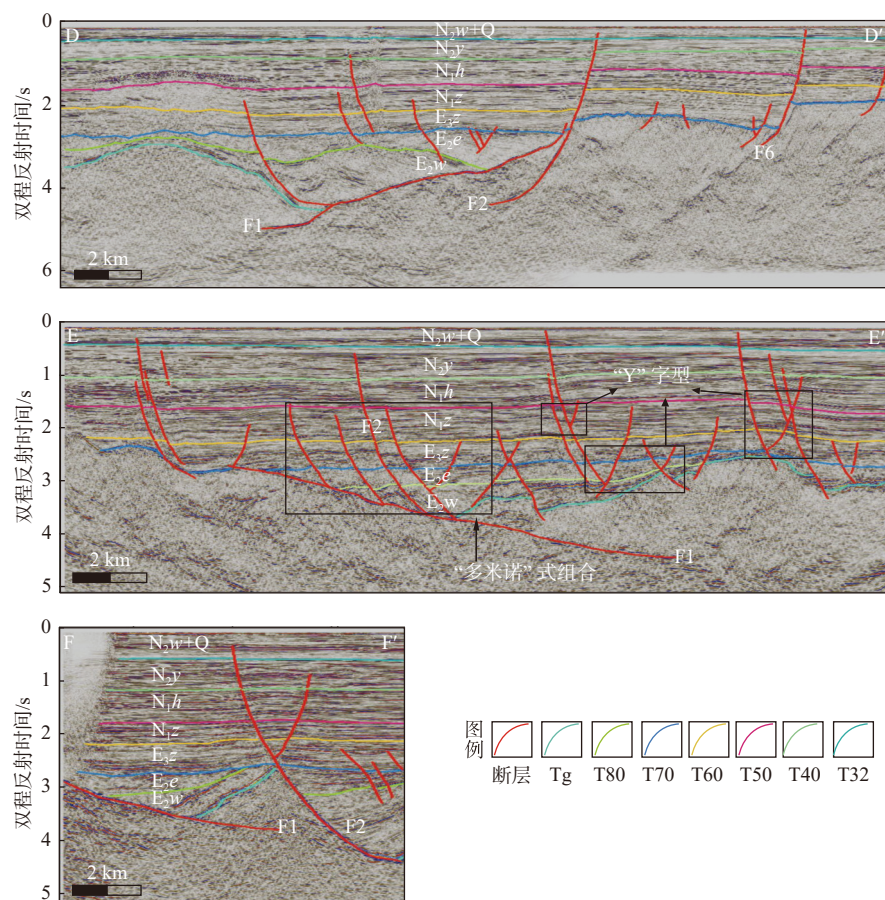
NEE 向断裂主要为 F2、F4、F5、F6 等。F2 断层在平面上延伸约 20 km, 南倾, 位于 F1 断层上盘之上, 西端与 F1 断层相接(图 2)。其垂向上切割层系较多, 向上切割至新近系粤海组或万山组, 向下深切进入古生界基底内。在剖面上, F2 断层表现为高角度铲式正断层, 断面上陡下缓, 至最下端趋于水平。F2 在文昌组、恩平组、珠海组、粤海组沉积期的断距分别约为 1140、771、384、478 msTWT(图 3CC')。

近 EW 向断层主要有 F3、F7 等。F3 断层在平面上延伸较短, 位于断层 F1 上盘之上, 在剖面上表现为高角度铲式正断层, 其切割地层较多, 向下切入古生界基底, 向上切至中新统粤海组。F3 在文昌组、恩平组沉积期的断距分别约为 316、185 msTWT; 进入珠海组沉积期, 断距不到 10 msTWT; 在粤海组沉积期的断距约为 36 msTWT(进入构造活化期)

(图 3AA')。

近 EW 向断裂还有一些后期发育的新生代中晚期断层, 在渐新世珠海组沉积期之后发育, 向上切割层系至上新统万山组, 向下切割层系至珠海组或恩平组。剖面上可见新生断裂与其上盘次级断裂形成“Y”字型构造样式, 体现了张扭性应力状态。在恩平凹陷中部, 一些中后期断层在剖面上同向排列, 形成“多米诺”式组合特征(图 4EE'), 断层上下盘同向倾斜, 断面随断块的旋转而运动。

恩平凹陷为 F1 断层控制的半地堑构造形态, 整体表现为“下断上拗”的双层构造模式。凹陷上层主要发育近 EW 向断裂, 对地层沉积的控制作用较小; 下层裂陷层系主要受 NE 向低角度正断层 F1 控制, 同时也受到了铲式高角度断层 F2 的切割复杂化, 最终形成了 EP17 洼、EP18 洼和 EP12 洼 3 个独立洼陷。从恩平凹陷西南端的 EP17 洼到东北端的 EP12 洼, 3 条 SN 向横切剖面揭示出了 F1 断层上盘同生沉积层厚度和宽度逐渐减小的特征(图 4), 地层厚度依次为 14、11、9 km, 地层宽度依



测线位置见图 2

图 4 恩平凹陷 SN 向测线剖面特征

Fig.4 Profile characteristics of north-south survey line in the Enping Sag

次为 35、13、8 km, 洼陷体积和基底埋深同样表现由大(深)变小(浅)的特征。EP17 洼为恩平凹陷最大的洼陷, 同时也是最主要的生烃洼陷^[22-23]。

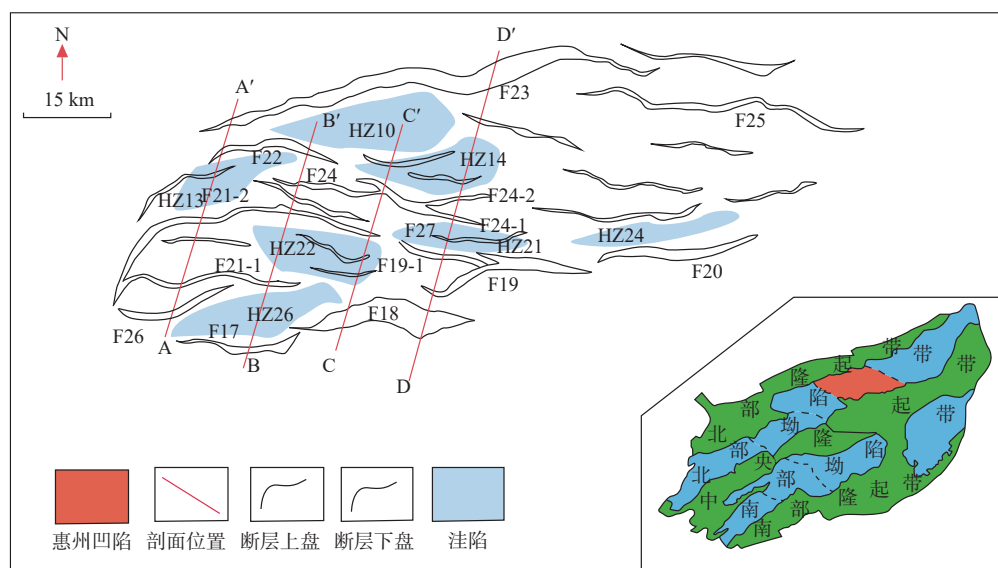
2.2 惠州凹陷

惠州凹陷主要包含近 EW 向、NEE 向和 NNW 向断裂, 凹陷内部断裂非常发育, 多达 100 余条, 均为生长性正断层^[24-25]。凹陷整体受凹陷南部的 F17、F18、F19、F20 等断层和凹陷北部的 F23、F25 等边界断层控制(图 5)。

近 EW 向断层主要包括 F17、F18、F19、F20、F21、F27 等, 其中, F17、F18、F19、F20 属于南部边界控凹断裂系, 平面上成雁列式排列, 延伸距离介于 20~30 km。平面上 F21-1 断层与 F21-2 断层在最西端相连, F21-2 断层由连接点向东走向由 NE 向转为近 EW 向, F21-1 断层位于 F21-2 的断层上盘(图 5)。剖面上 F21-1 断层主要表现为高角度铲式正断层, F21-2 断层则表现为高角度板式正断层。F21-1 断层切割地层相对较少, 向下延伸进入古生界基底内, 向上切割至粤海组, 其在文昌组沉积期的断距约为 453 msTWT, 在恩平组沉积期断距约为 334 msTWT, 粤海组沉积期断距约为 56 msTWT, 至万山组沉积期, 断距约为 20 msTWT。相比于 F21-1 断层, F21-2 断层切割地层较多, 断层向下仅切割至恩平组, 向上切割至万山组及第四系, 在恩平组沉积期断距约 168 msTWT, 珠海组沉积期断距约为 41 msTWT, 粤海组沉积期断距约为 43 msTWT,

至万山组沉积期, 断距约为 27 msTWT(图 6 AA')。F27 断层在剖面上呈现高角度铲式正断层样式, 切割地层较多, 向下切至古生界基底, 向上切至万山组及第四系, 文昌组沉积期最大断层断距约为 436 msTWT, 恩平组沉积期断距约为 286 msTWT, 珠海组沉积期断距约为 49 msTWT, 粤海组沉积期断距约为 147 msTWT, 至万山组沉积期及第四纪, 断距陡降至 42 msTWT(图 6 DD')。

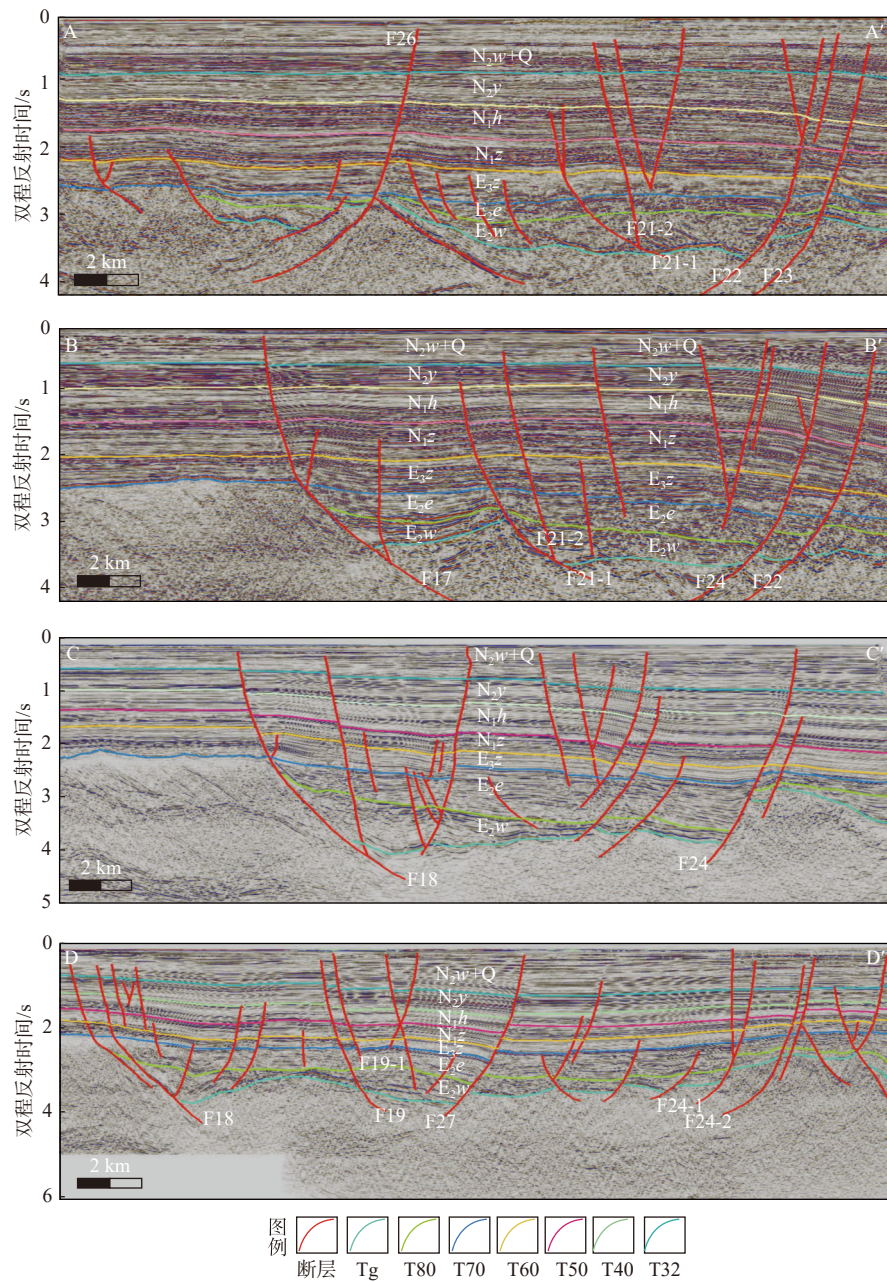
NEE 向断层主要包括 F23 和 F25, 其中, F23 断层属于北部重要的控凹断裂, 影响和控制着凹陷的发育及演化。F23 断层在平面上延伸长度约 80 km, 断层线在平面上表现为凹凸相间的锯齿状, 断层走向呈现由 NE60°—NW45°—NE60°—NW45°的变化^[26], 断面形态呈现由板式—铲式—坡坪式—铲式—板式的变化, 断层倾角也同时跟随转变。F23 断层沿走向的几何学特征多样性表明其早期由多段孤立断层组成, 后期沿着走向发生生长侧向连接组合在一起, 形成一条大型断层, 从而控制了凹陷晚期的形成和发育。剖面上 F23 断层呈高角度铲式正断层发育, 从上到下错断了第四系至古生界基底内的地层。F23 断层在文昌组、恩平组、珠海组、粤海组沉积期的断距分别约为 189、236、54、103 msTWT, 至万山组沉积期约为 32 msTWT(图 6 AA')。F25 断层属于高角度铲式正断层, 其向下深切进入古生界基底之内, 向上断至万山组及第四系。F25 断层在文昌组、恩平组、珠海组、粤海组沉积时期的断距分别约为 454、329、68、45 msTWT, 至万山组沉



据文献 [21] 修改

图 5 惠州凹陷主干断裂展布

Fig.5 Distribution of main faults in Huizhou Sag



测线位置见图 5

图 6 惠州凹陷 NNE 向测线剖面特征

Fig.6 Profile characteristics of NNE line survey in the Huizhou Sag

积期断距约为 18 msTWT(图 6 AA')。

NWW 向断裂数量较少且发育规模较小, 主要包括 F22 断层和 F24 断层(图 5)。F22 断层由西向东走向由近 EW 向转为 NWW 向, 大致呈向北凸出弯曲的展布形态。剖面上 F22 属于高角度铲式正断层, 向下断穿古生界基底面切入基底内, 向上断至万山组。F22 断层在文昌组、恩平组、珠海组、粤海组沉积时期的断距分别约为 536、278、42、51 msTWT, 至万山组沉积期断距约为 27 msTWT(图 6 AA')。相比于 F22 断层, F24 断层在在文昌组、恩

平组、珠海组、粤海组沉积时期的断距分别约为 504、259、57、109 msTWT, 至万山组沉积期断距约为 68 msTWT(图 6 CC')。F22 和 F24 断层均可以与其次级断裂形成“Y”字型组合样式, 表明两者具有走滑特征(图 6 AA'、BB')。

惠州凹陷整体受南北边界断裂带控制, 剖面上大多数断层向下切穿基底面至古生界基底内, 向上切至层位新老不等, 总体表现为高角度板式或铲式正断层, 局部可见“Y”字型和“多米诺”式组合构造样式。在 AA'剖面(凹陷西部)中, 凹陷宽 12 km、

上覆地层厚约 8.9 km, 在 F22 断层和 F23 断层控制下, 凹陷“北断南超”, 地层呈现向南减薄的楔形形态, 为典型的半地堑结构格局(箕状断陷); 在 BB'剖面中, 凹陷宽 18 km、上覆地层厚约 10.2 km, 受北部 F17 断层和南部 F22 断层、F24 断裂联合控制, 凹陷整体呈现“双断式”的对称地堑结构特征; 在 CC'和 DD'剖面中, 凹陷宽分别为 20 和 31 km, 上覆地层厚度分别为 11.2 和 10.7 km, 均受 F18 断层和 F24 断裂联合控制, 整体也是呈现“双断式”对称地堑的结构特征(图 6)。因此, 惠州凹陷表现出从西向东逐渐变宽、体积逐渐变大的结构样式, 但其基底埋深近乎水平延伸。

3 断层动态追踪与构造演化

珠江口盆地中断裂体系、构造样式及盆地结构的现今发育特征, 是在古生代基底之上盆地经过多期次的构造演化和叠加改造的结果^[27-29]。因此, 在对盆地构造静态刻画与描述的基础上, 通过对断层活动速率的定量计算^[30], 明确新生代各个构造阶段主要的控盆断裂体系, 辨析各活动时期不同凹陷构造活动的差异性, 最终重新厘定了盆地构造演化阶段。

3.1 断裂运动性定量表征

断陷盆地中, 不同类型断层两盘地层的沉积、剥蚀作用具有一定的差异性^[31], 因此在定量表征断层活动强度时需要采用不同的方法。本文采用断层活动速率法对研究区十余条主干断层的垂向活动强度进行了定量计算, 发现不同方向、不同凹陷断裂的活动时期与活动强度存在明显差异。

3.1.1 恩平凹陷

NE 向 F1 断层于文昌组沉积期开始活动和活动强度达到峰值, 至恩平组沉积期活动强度有所回落, 进入珠海组沉积期以后逐渐消亡。因此, F1 断层主要是在裂陷期活动, 属于早期断层(图 7a)。

NEE 向和近 EW 向断层的整体活动持续时间长, 其中, F2 断层从文昌组沉积期开始活动, 进入恩平组沉积期后断层活动迅速增强, 但进入珠海组沉积期(拗陷期)后断层活动又迅速减弱, 随后活化期受东沙运动影响, F2 断层又重新活化并继承性发育, 表现出“双峰式”的活动特征^[32], 因此, F2 断层属于长期活动断层。F3 断层在文昌组沉积期开始活动并且在恩平组沉积期活动强度达到峰值, 随后逐渐

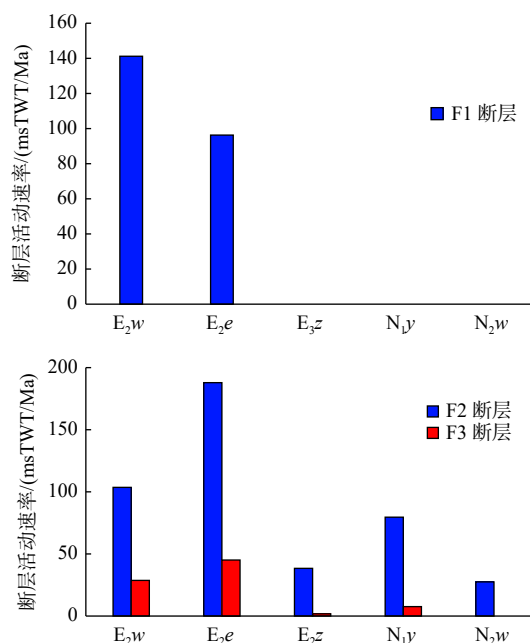


图 7 恩平凹陷断裂活动速率

Fig.7 The fault activity rate in the Enping Sag

减弱至珠海组沉积期基本静止, 但是在粤海组沉积期又发生了微弱活动, 同样具有“双峰式”活动特征, 因此, F3 断层也属于长期活动断层(图 7b)。

3.1.2 惠州凹陷

NEE 向和近 EW 向断层的数量多, 整体活动时间较长, 具有“双峰式”活动的特征。除 F21-2 断层在恩平组沉积时期开始发育外, 其他断层都是在文昌组沉积期开始发育, 且在恩平组沉积活动速率达到峰值, 至珠海组沉积期活动速率又迅速降低, 再到粤海组沉积时期活动速率发生微弱增强, 最后到万山组沉积时期活动速率又发生微量回落。其中, F23、F26 和 F27 属于长期活动断层(图 8a)。

NWW 向断层主要包括 F22 断层与 F24 断层, 同样具有持续活动时间较长且呈“双峰式”活动的特征。F22 断层和 F24 断层均在文昌组沉积时期开始活动, 在恩平组沉积时期活动强度到达峰值, 之后进入珠海组沉积期逐渐趋于静止, 但是在活化期受东沙运动的影响, 2 条断层又继承性发育。对比来看两者整体活动趋势基本一致, 因此, F22 断层和 F24 断层都属于长期活动断层(图 8b)。

3.2 构造演化阶段划分

在横向上不同凹陷之间断裂体系特征具有一定的差异性, 在垂向上不同时期断裂体系活动的方向和强度具有一定的阶段性(图 9)。根据这些特性, 可以将珠一坳陷断裂演化发育重新划分为裂陷早

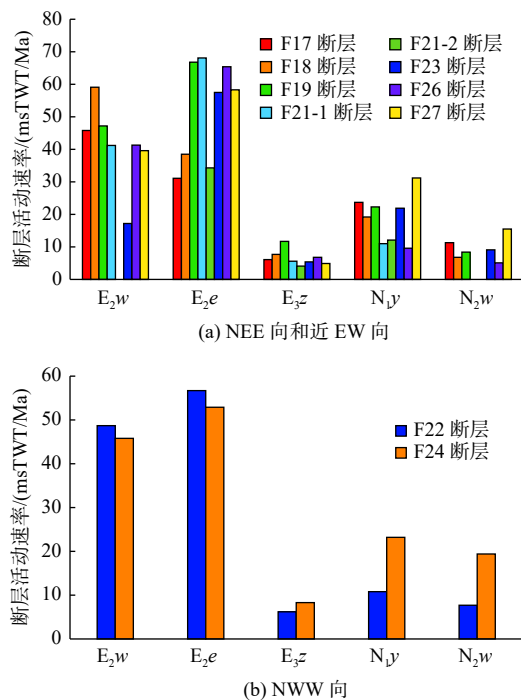


图 8 惠州凹陷断裂活动速率

Fig.8 The fault activity rate in the Huizhou Sag

期(E_{2w})、裂陷晚期(E_{2e})、拗陷期(E_{3z}-N_{1y}-N_{1h})和构造活化期(N_{1y}-N_{2w}-Q)4个期次。

3.2.1 裂陷早期(E_{2w})

该时期以 NE 向和近 EW 向断层为主要控盆断裂。西部恩平凹陷以 NE 向和近 EW 向断层为主导,且恩平凹陷 F1 断层和 F2 断层的活动强度非常大,

控制了该时期的恩平凹陷总体格局。自西向东有 NE 向断层的控制作用逐渐减弱和近 EW 向断层控制作用逐渐增强的趋势,至东部的惠州凹陷时,近 EW 向和 NWW 向断层成为主要控盆断裂,体现出该时期主要控盆断裂走向自西向东存在顺时针旋转(图 10a)。

3.2.2 裂陷晚期(E_{2e})

研究区断裂体系发育情况在文昌组沉积期发生了很大变化,控盆断裂走向整体由早期 NE 向顺时针转变为现今近 EW 向或 NWW 向,因此,从早期至现今,NE 向控盆断裂活动强度由强减弱,而近 EW 向或 NWW 向断层活动强度由弱增强。由于不同凹陷先期主要控盆断裂的差异性影响导致不同地区沉积中心迁移过程存在一定差异。

恩平凹陷 F1 断层东段(NE 向段)已基本消亡,仅西段(SN 向段)与 F2 断裂一起继承性发育,断裂活动强度明显减弱,但是 NEE 向的 F2 断层活动强度明显增加,其成为恩平凹陷主要的控凹断裂。惠州凹陷该时期断裂多体现继承性发育,主要的控盆断裂方向基本没有发生转变,但是断裂活动强度发生一定的交替变化,断裂活动有向北偏移的趋势(图 10b)。

伴随着断裂活动的北移,凹陷沉积中心也有北移趋势。文昌组沉积时期恩平凹陷中心位于强烈活动的 F1 断层附近,至恩平组沉积时期, F1 断层活

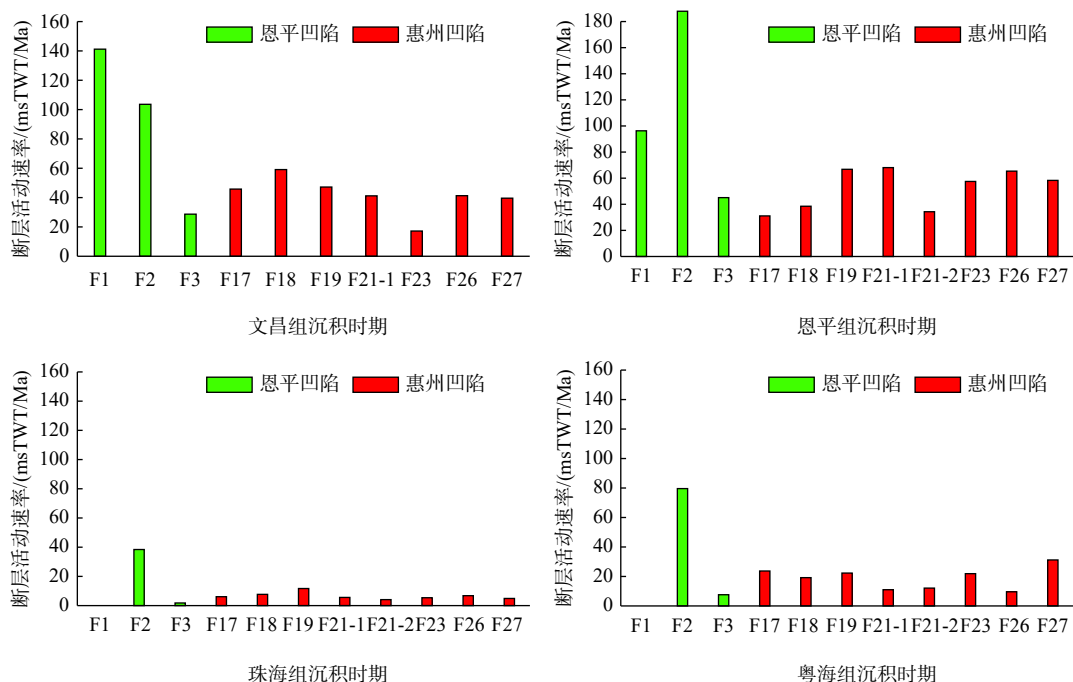


图 9 不同时期断裂活动速率

Fig.9 The fault activity rates in different periods

动减弱, 而 F2 断层活动增强, 沉积中心迁移至 F2 断层附近, 也就是说沉积中心从 EP17 洼向北迁移至 EP18 洼。惠州凹陷表现为南北边界控凹断裂的交替活动, 凹陷形态在文昌组沉积时期主要受南部边界断裂控制, 此时凹陷沉积中心往南部边界倾斜;

恩平组沉积时期, 南部边界断裂活动强度有所减弱, 而北部边界 F23 断层活动逐渐增强, 此时南北边界共同控制凹陷形态, 沉积中心微弱北移, 因此, 盆地的整体形态出现文昌组与恩平组的双层反向楔形的叠置特征(图 11)。

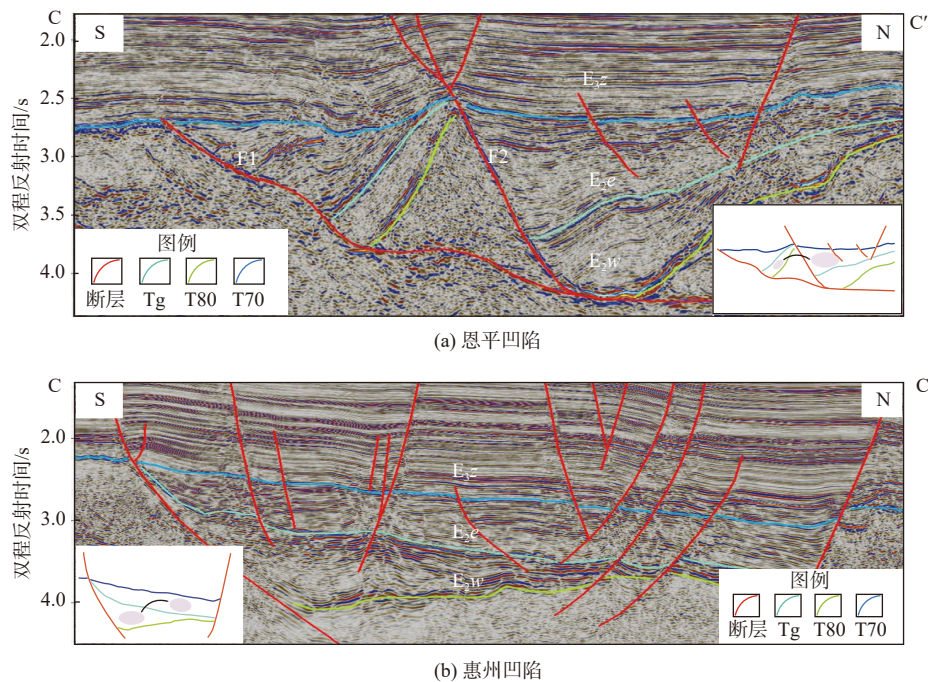


图 10 恩平凹陷与惠州凹陷沉积中心从文昌组向恩平组迁移

Fig.10 The deposition center shift of the Enping Sag and Huizhou Sag from the Wenchang Formation to the Enping Formation

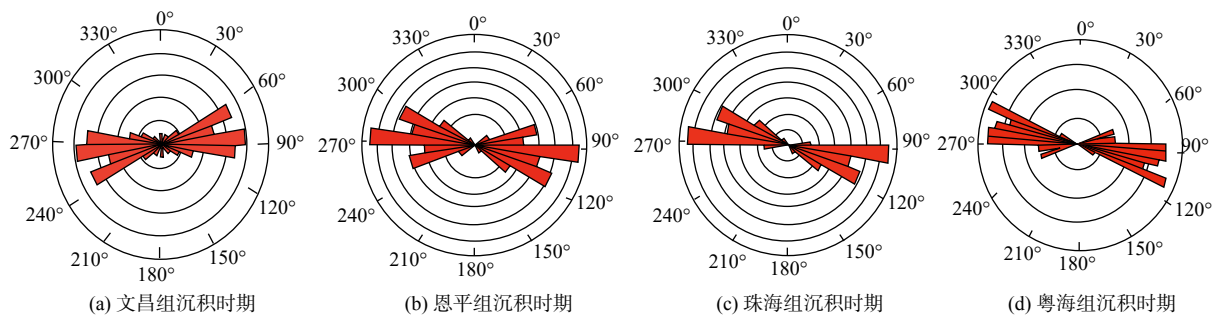


图 11 不同时期断裂走向玫瑰花图^[33]

Fig.11 Rose chart of fault strike in different periods^[33]

3.2.3 拗陷期 ($E_3z-N_1z-N_1h$)

断裂体系垂向活动微弱, 大多为先期断裂继承性活动, 断裂数量明显减少。NE 向和 NEE 向断裂已趋于消亡, 仅有少量近 EW 向和 NWW 向断层继承性发育, 且活动强度也比较微弱。该期表现为裂后热沉降特征, 地层以披覆式模式进行沉积(图 10c)。

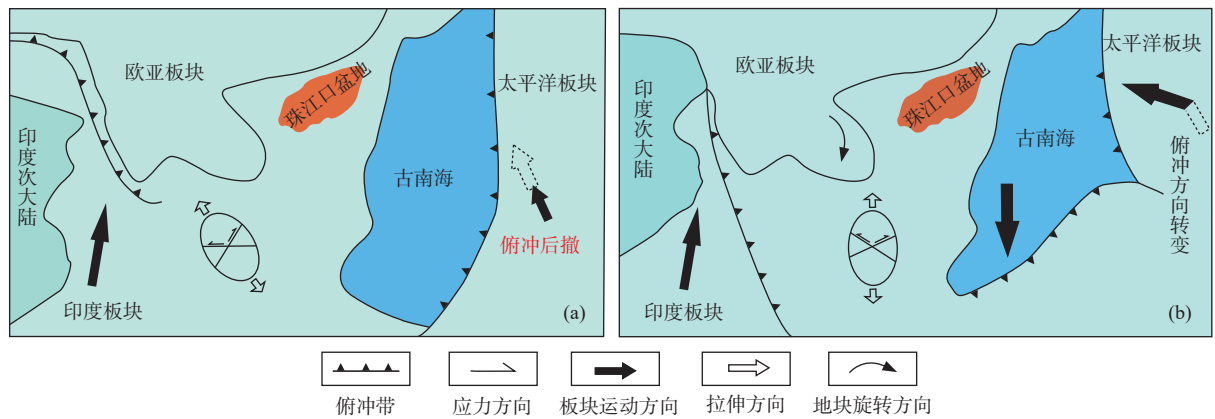
3.2.4 构造活化期 (N_1y-N_2w-Q)

进入中新世晚期粤海组沉积时期以来, 先期发育的近 EW 向和 NWW 向控盆断裂开始活化, 其断裂活动强度有所回升, 断层垂向活动速率也同时增

大。新生大量近 EW 向、NE 向和 NWW 向断层, 断层数量明显增多, 在平面上呈现出雁列式展布特征, 整个断裂体系具走滑特征(图 10d)。

3.3 珠一坳陷构造应力场

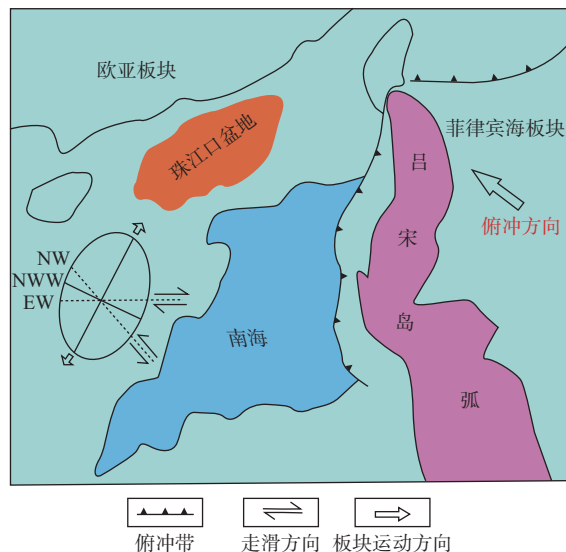
据以上断裂活动与构造演化分析, 推测裂陷早期(E_2w)印度板块开始高速俯冲, 同时太平洋板块俯冲后撤, 引起南海区域应力场由挤压环境演变为 NW—SE 向拉伸环境(图 12a)^[21,33], 造成区域控凹断裂以 NE 向展布为主。

图 12 裂陷早期 (a) 与裂陷晚期 (b) 断裂转型的区域动力背景^[36]Fig. 12 Regional dynamic background of fault transformation in the early rifting (a) and late rifting (b)^[36]

裂陷晚期(E_2e)印支地块以 NE 向与欧亚板块发生陆-陆碰撞, 导致古南海向南俯冲于婆罗洲地块以下, 最终在印支地块旋转挤出与古南海的俯冲作用下, 区域应力场发生转向^[34-36], 形成近 SN 向拉伸作用(图 12b), 造成区域控凹断裂以近 EW 向展布为主, 同时断裂体系与凹陷中心也逐渐向北迁移。

拗陷期($E_3z-N_1z-N_1h$)南海区域整体处于宁静沉积时期, 新南海逐渐扩张致使南沙块体逐渐向南漂移^[37], 研究区区域断裂活动较微弱。

构造活化期(N_1y-N_2w-Q)新南海扩张停止, 菲律宾板块的运动方向由 NW 向转变为 NWW 向, 同时, 吕宋岛弧与欧亚板块发生弧-陆碰撞^[38-41], 造成珠江口盆地 NW、NWW 向挤压环境转变为 NEE 向剪切环境(图 13), 因此, 新增一系列 NWW 向走滑断层。

图 13 构造活化期的区域动力背景^[41]Fig. 13 Regional dynamic background during tectonic activation^[41]

4 讨论

4.1 几何学特征对比

基于静态几何学特征的精细解剖, 对比研究珠江口盆地北部恩平凹陷与惠州凹陷的时空差异性发现: ①恩平凹陷主要受 F1 低角度正断层控制且断层发育规模较小, 而惠州凹陷主要受雁列式展布的南北边界高角度正断层控制且断层发育规模较大; ②恩平凹陷主控断层为 NE 向的 F1 断层和 NEE 向的 F2 断层, 而惠州凹陷主要受 NEE 向和近 EW 向(或 NWW 向)断裂系控制; ③恩平凹陷自西向东逐渐变窄变浅, 体积逐渐减小, 而惠州凹陷自西向东逐渐变宽, 其基底埋深基本保持水平延伸, 体积逐渐增大; ④恩平凹陷整体呈现楔形半地堑构造样式, 而惠州凹陷呈现双断或多断地堑构造样式。

4.2 运动学特征对比

基于断层活动过程的动态分析, 对比研究珠江口盆地恩平凹陷与惠州凹陷断层活动速率与构造演化过程发现: ①NE 向断层主要分布在恩平凹陷, 数量少但活动强度大。其在文昌组沉积时期活动速率达到峰值, 之后逐渐减弱到珠海组沉积时期趋于静止, 属于在裂陷期发育和活动的早期低角度正断层, 因此, 基本不参与油气运移与成藏。②NEE 向和近 EW 向断层是恩平凹陷与惠州凹陷的主力断层系, 其分布广泛且活动时间较长。它们都是在文昌组沉积时期开始发育且在恩平组沉积时期活动速率达到峰值, 然后迅速回落至珠海组沉积时期趋于静止, 之后到粤海组沉积时期又重新活化活动,

最终进入万山组沉积时期又逐渐减弱, 总体呈现“双峰式”活动特征。但不同的是, NEE 向恩平凹陷的 F2 断层活动速率明显高于惠州凹陷的 F23 断层、F26 断层等, 因此, 在恩平凹陷局部出现油气成藏有利区。③NWW 向断层主要分布于惠州凹陷, 恩平凹陷分布较少且活动强度较低。其在文昌组沉积时期开始发育, 在恩平组时期活动强度达到峰值, 至珠海组沉积时期迅速回落, 最后进入粤海组沉积时期又活化重新活动并持续至万山组沉积时期, 属于长期活动断层。NWW 向断层的活化、活动时期与珠江口盆地油气成藏期基本吻合, 对油气运移与成藏有一定的控制作用。

4.3 断裂特征差异性原因

前人砂箱模拟实验提出先存断裂对裂陷盆地断裂体系的控制作用有: ①先存断裂在一定条件下优先活动, 而较大规模的断裂会构成裂陷盆地的基本格架; ②先存断裂控制下的断层走向、大小及规模等存在明显差异; ③先存断裂走向与伸展方向的夹角逐渐增大时, 先存断裂的活动性就会增强, 当夹角为 90° 时的断裂活动性最强^[42-43]。恩平凹陷存在 NE 向先存低角度断层^[44], 在 NW—SE 向区域拉张应力场下, 断层走向与应力场方向趋于垂直, 因此在恩平凹陷先存断裂在裂陷期表现出了强烈的活动性。而惠州凹陷存在 NW 向先存断裂且形成时代略晚于 NE 向先存断裂^[45], 先存断裂走向与应力场方向趋于平行, 因此受断裂走向与应力场方向相交角度及形成时间影响, 惠州凹陷 NW 向先存断裂活动时间晚于恩平凹陷 NE 向先存断裂, 同时惠州凹陷 NW 向先存断裂活动性也弱于恩平凹陷 NE 向先存断裂。其次, 不同时期区域应力伸展方向也发生了顺时针变化, 从文昌组沉积时期—恩平组沉积时期—粤海组沉积时期, 应力场方向从 NW 向—近 SN 向—NE 向转变, 在不同时期控制了不同发育方向的断裂系走向、规模及演化^[46]。因此, 凹陷基底先存断裂展布方向、形成时间和构造应力转向是造成恩平凹陷与惠州凹陷断裂特征差异性的主要原因。

5 结论

(1) 恩平凹陷与惠州凹陷具有静态几何学差异性。恩平凹陷主要受 F1 低角度正断层控制且断层发育数量较少、规模较小; 而惠州凹陷主要受南北

边界雁列式展布的高角度正断层控制且断层发育数量较多、规模较大。因此, 惠州凹陷更有利于油气运移与聚集, 容易形成较大中型油气田。

(2) 恩平凹陷与惠州凹陷具有动态运动学差异性, 主要体现在恩平凹陷的 NEE 向断层 F2 活动速率明显高于惠州凹陷的 F23 断层、F26 断层等。F2 表现为长期活动断层, 因此, 在恩平凹陷局部出现如 F2 断层控制的油气成藏有利区。

(3) 依据断层特征及其活动的差异性, 将珠江口盆地断裂体系发育重新划分为裂陷早期(E_2w)、裂陷晚期(E_2e)、拗陷期($E_3z-N_1z-N_1h$)和构造活化期(N_1y-N_2w-Q)4 个期次。构造活化期(N_1y-N_2w-Q)的近 EW 向和 NWW 向断裂的活动时期与烃源岩生排烃时期大致吻合, 可将其作为后期构造精细研究的重点。

参考文献:

- [1] 于水明, 陈雪芳, 梅廉夫, 等. 珠一坳陷断层特征及对油气成藏的作用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 50-54.
- [2] 罗群. 断裂带的输导与封闭性及其控藏特征[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 474-479.
- [3] 施和生, 代一丁, 刘丽华, 等. 珠江口盆地珠一坳陷油气藏地质特征与分布发育基本模式[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 120-133, 155.
- [4] 姜大朋, 王文勇, 高翔, 等. 从内部结构出发探讨断裂控藏机理及模式: 以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 91-97.
- [5] 漆家福, 吴景富, 马兵山, 等. 南海北部珠江口盆地中段伸展构造模型及其动力学[J]. 地质前缘, 2019, 26(2): 203-221.
- [6] 何金海, 吴静, 白海军, 等. 珠江口盆地恩平凹陷油气沿断层走向运移模式[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(8): 55-66.
- [7] YE Q, MEI L F, SHI H S, et al. A low-angle normal fault and basement structures within the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: insights into late Mesozoic to early Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea area[J]. Tectonophysics, 2018, 731/732: 1-16.
- [8] 彭辉界, 庞雄奇, 李洪博, 等. 珠江口盆地珠一坳陷断裂控藏定量表征与有利勘探区预测[J]. 现代地质, 2016, 30(6): 1318-1328.
- [9] SHI H S, DAI Y D, LIU L H, et al. Genetic pattern of belt-wide petroliferous phenomenon in the eastern Pearl River Mouth Basin and its practical application[J]. Petroleum Science, 2014, 11: 1-13.
- [10] 宋亚民, 戴朝强, 张丽萍. 恩平凹陷南部斜坡断层阴影带构造恢复方法研究[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2194-2202.
- [11] 郝鑫, 吴智平, 颜世永, 等. 珠江口盆地珠一坳陷浅层油气成藏模式研究[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 113-121.
- [12] 朱定伟, 彭光荣, 张忠涛, 等. 珠江口盆地恩平凹陷北部披覆带油气成藏条件[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 36-44.

- [13] 邵磊, 庞雄, 乔培军. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 179-185.
- [14] 王家林, 张新兵, 吴健生, 等. 珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(2): 13-22.
- [15] ZHANG Y F, SUN Z. A study of faulting patterns in the Pearl River Mouth Basin through analogue modeling[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2013, 34(3/4): 209-219.
- [16] 解习农, 任建业, 王振峰. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 77-87.
- [17] FENG C J, YAO X Z, YANG H Z, et al. Source - sink system and sedimentary model of progradational fan delta controlled by restricted ancient gully: an example in the Enping Formation in the Southern Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 232-247.
- [18] 赵淑娟, 吴时国, 施和生, 等. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1008-1019.
- [19] SHI H S, DU J Y, MEI L F, et al. Huizhou Movement and its significance in Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development Online*, 2020, 47(3): 483-498.
- [20] LIU J, LIANG D H, PENG G R, et al. Seismic integrated study for offshore deep- and thin-stratum characterization: a case study from the Enping Sag within the Pearl River Mouth Basin[J]. *The Leading Edge*, 2020, 39(3): 176-181.
- [21] 胡阳. 珠一坳陷新生代断裂体系及其对盆地结构的控制作用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [22] MA B S, QI J F, CHEN W C. Fault interaction and evolution during two - phase rifting in the Xijiang Sag, Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(2): 1128-1147.
- [23] 何清吟, 叶加仁, 舒誉, 等. 恩平凹陷南部断裂带油气成藏特征及主控因素[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(9): 43-48.
- [24] WANG X L, HE S, WU J F, et al. Tectonic controls on lacustrine source rock occurrence in the Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *International Geology Review*, 2020, 62(1): 72-93.
- [25] LÜ C L, ZHANG G C, YANG D S. Differential extension and dynamic model of the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2017, 2(3): 191-200.
- [26] 田巍, 何敏, 杨亚娟, 等. 珠江口盆地惠州凹陷北部边界断裂复合联接和转换[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2015, 40(12): 2037-2051.
- [27] LIZADEH A, HOSEYNALIZADEH Z. Analysis of the stress regime and tectonic evolution of the Azerbaijan Plateau, North-western Iran[J]. *Geotectonics*, 2017, 51(3): 308-318.
- [28] LI Y H, ZHU R W, LIU H L. The Cenozoic activities of Yangjiang-Yitongdong Fault: insights from analysis of the tectonic characteristics and evolution processes in western Zhujiang (Pearl) River Mouth Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(9): 87-101.
- [29] 周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 147-160.
- [30] 吴静. 珠江口盆地恩平凹陷北部隆起区油气远源富集与主控因素[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(4): 117-124.
- [31] 郑金云, 代一丁, 刘军, 等. 南海北部陆缘地壳结构及其伸展破裂过程的差异性[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(3): 12-22.
- [32] 涂乙, 闫正和, 戴建文, 等. 中国南海珠江口盆地西江油田运聚再生油藏模式创新认识与挖潜效果[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 522-532.
- [33] 施和生, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 777-791.
- [34] 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等. 先存俯冲陆缘背景下珠江口盆地断陷结构的多样性[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 1-11.
- [35] 包汉勇, 郭战峰, 张罗磊. 太平洋板块形成以来的中国东部构造动力学背景[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(3): 337-338, 340-346.
- [36] 孙珍. 南海的形成与演变[J]. *自然杂志*, 2022, 44(1): 31-38.
- [37] 翦知潜, 田军, 黄维, 等. 南海海盆演变与深部海流[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 52-56.
- [38] LÜDMANN T. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 1999, 311(1): 79-91.
- [39] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三坳陷油气成藏模式与分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(3): 275-281, 286.
- [40] 钟志洪, 施和生, 朱明, 等. 珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 20-29.
- [41] 范建柯. 菲律宾海板块西边缘的地震层析成像研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [42] 童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 等. 裂陷盆地断层的形成和演化—目标砂箱模拟实验与认识[J]. *地质学报*, 2009, 83(6): 759-774.
- [43] 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 等. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J]. *地学前缘*, 2009, 16(4): 97-104.
- [44] 刘海伦, 梅廉夫, 施和生, 等. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[J/OL]. *地球科学*, 2018: 1-17.
- [45] 鲁宝亮, 孙晓猛, 张功成, 等. 南海北部盆地基底岩性地震—重磁响应特征与识别[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(2): 563-572.
- [46] 赵萌. 珠江口盆地西江凹陷-白云凹陷构造对比研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.

Difference in fault characteristics and tectonic evolution between Enping Sag and Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin

LI Bo¹, DENG Chao^{1,2*}, ZHOU Liang¹, JI Kai¹, SHU Yu³, WU Yuxiang³

(1 Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2 State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3 Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on previous studies, using 2D seismic data of the Enping Sag and Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin, combined with fault activity rate analysis, the difference between geometry and kinematics of fault system in the sags was studied. According to the fault characteristics and difference in fault activity, the development and evolution of the fault system in the north of the Pearl River Mouth Basin could be divided into four tectonic stages: early rifting (E_2w), late rifting (E_2e), depression ($E_3z-N_1z-N_1h$), and tectonic activation (N_1y-N_2w-Q). Meanwhile, based on research results on fault distribution scale, activity rate, and activation period, we speculated that the Huizhou Sag is more conducive to the formation of large and medium-sized oil and gas fields than the Enping Sag. Therefore, we recommended to focus on the late structural activity of faults in the EW and NWW directions.

Key words: fault activity rate; basin-controlling fault; tectonic evolution; Enping Sag; Huizhou Sag; Pearl River Mouth Basin